



**ORGANIZACION  
LATINOAMERICANA  
DE ENERGIA**

**SECRETARIA PERMANENTE**

**BOLETIN ENERGETICO No. 15**

**ABRIL / JUNIO 1980**



# Potencia y energía del viento

Habiendo estudiado el fenómeno viento, el punto que nos interesa es el aprovechamiento energético del mismo. Visto el potencial eólico de un sitio como un recurso energético, es necesario evaluarlo y caracterizarlo para poder establecer las condiciones óptimas de operación del sistema conversor de energía eólica (SCEE), destinado a aprovechar ese recurso bajo restricciones técnico-económicas, fijadas por los límites prácticos para:

1. Área de la sección transversal al flujo de aire, que es posible abarcar para extraer energía del viento, y

2. Altura sobre el nivel del suelo a la que es práctica realizar esta extracción de energía.

Por limitaciones de tipo tecnológicas y económicas, únicamente el viento que fluye en los primeros 150 metros sobre el nivel del suelo es factible aprovechar con la actual tecnología, limitándose también el área unitaria barrida a la de una circunferencia con un diámetro de 100 metros.

A continuación se exponen las características de potencia y energía del viento.

## I ECUACIONES DE POTENCIA Y ENERGÍA

El viento es el aire en movimiento. El aire tiene masa, aunque su densidad es baja y cuando esta masa lleva una velocidad, el viento resultante tiene una energía cinética proporcional al producto  $1/2 \times \text{masa} \times (\text{velocidad})^2 /$

Si  $p =$  La masa por unidad de volumen de aire (densidad)  
 $V =$  velocidad del viento  
 $A =$  un área que atraviere el viento

La masa de aire que pasa por unidad de tiempo es  $pAV$ , y la energía cinética que atraviesa el área por unidad de tiempo es:

$$P = 1/2 \cdot pAV \cdot V^2 = 1/2 \cdot pAV^3$$

Esta es la potencia total disponible en el viento.

La densidad de potencia del viento, expresada en watts/m<sup>2</sup> en el plano vertical y a 10 m. de altura,

---

Trabajo presentado por el Ing. Enrique Caldera Muñoz del Instituto de Investigaciones Eléctricas de México (IIE) en el I Curso Seminario Latinoamericano sobre Prospección, Evaluación y Caracterización de la Energía Eólica, realizado por OLADE y el IIE en Cuernavaca del 26 al 30 de mayo de 1980.

es una manera de definir el potencial eólico de un punto. Esta potencia por unidad de área es función directa del cubo de la velocidad del viento:

$$P/A = K V^3$$

donde K es una constante que depende de la densidad del aire y de las unidades en que se expresa la potencia y la velocidad. Esta expresión se conoce como la ley del cubo y es indicativa de porqué es necesario un registro continuo de velocidades para hacer una estimación correcta de un contenido energético, ya que existe una diferencia entre el cubo de la velocidad media y el promedio de los cubos de un conjunto de velocidad en una distribución dada. La figura 1, muestra gráficamente la relación entre velocidad y potencia.

Si matemáticamente expresamos el viento como un vector, éste en la realidad se comporta de una manera aleatoria, variando su rumbo y velocidad de tal suerte que, cuando expresamos su potencia por unidad de área, nos referimos a promedios estadísticos, obtenidos a partir de mediciones continuas anemográficas, por un período de un año al menos.

Siendo la potencia del viento proporcional al cubo de su velocidad, se aprecia que variaciones porcentualmente pequeñas en la velocidad del viento tienen una fuerte repercusión por cuanto a su potencia. Un viento de 20 Km/hr (5.55 m/s) tiene una potencia de 109.6 w/m<sup>2</sup> y uno de 25 Km/hr (6.94 m/s) de 213.85 w/m<sup>2</sup>, en tanto que un viento de 50 Km/hr (13.88 m/s) que mueve a los árboles y se dificulta caminar contra él, tiene una potencia de 1720.8 w/m<sup>2</sup>.

Puede decirse que, en lugares buenos, a 10 metros de altura, la energía del viento es similar en magnitud a la densidad de energía solar que se recibe en el suelo en un período de 24 horas, representando una potencia media del orden de 200 watts/m<sup>2</sup> para las latitudes comprendidas entre los dos trópicos.

A mayor altura, la energía eólica se incrementa en razón del gradiente vertical de velocidades, ocasionado por la fricción del viento contra la superficie del terreno.

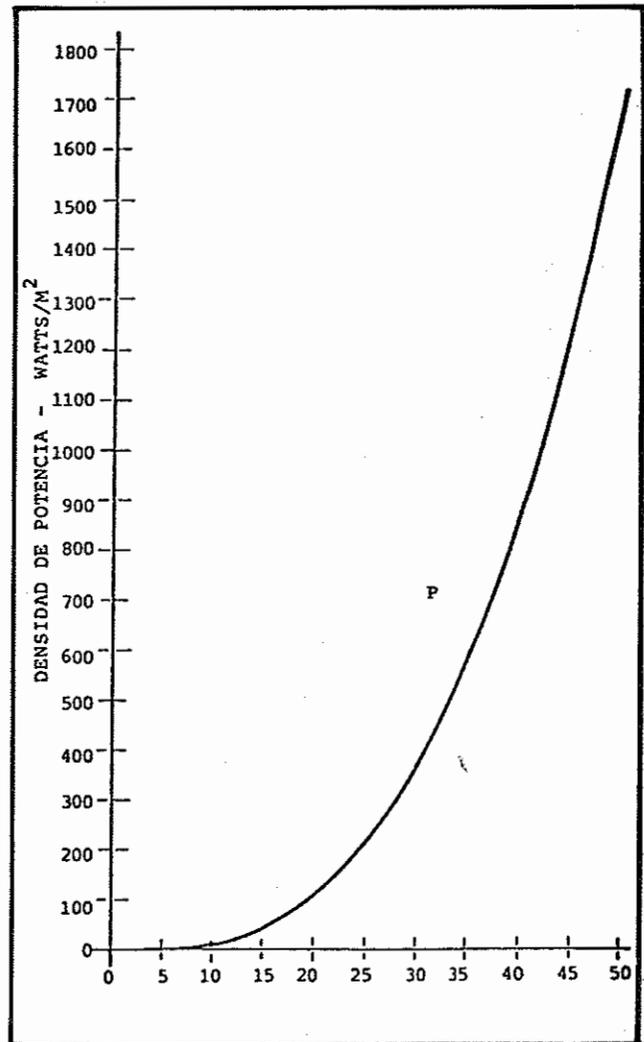
De toda la potencia del viento sólo es posible obtener una fracción, que tiene un límite teórico establecido por el científico alemán A. Betz en 1927, por el cual un aeromotor ideal sólo puede extraer 16/27 ó 59.3 o/o de la potencia del viento. Para obtener el 100 o/o de la energía cinética del viento, sería necesario que el equipo conversor le quitase el movimiento, reduciendo su velocidad hasta cero, lo cual es imposible.

## VELOCIDAD DEL VIENTO - KM/HR

### POTENCIA EN EL VIENTO

$$P = K AV^3$$

FIGURA 1



De esta manera la ecuación que define la potencia aprovechable del viento, para condiciones ideales es:

$$P = 0.593 KAV^3$$

Dadas las características aleatorias del viento, de terminar su potencia y energía en un período de tiempo, será resultado de un análisis estadístico del rango de velocidad observado, y la duración total de cada intervalo de velocidad. En esta forma, la energía del viento que atraviesa una unidad de área en un plano vertical, siempre perpendicular al viento, durante un período de tiempo, está dada por la expresión:

$$E = \sum_{i=1}^n P_i t_i$$

$i = 1 \dots n$ , intervalos de velocidad de viento a los que corresponde una potencia ( $P_i$ ) y una duración acumulada  $t_i$

La potencia media durante el período  $T$  será por tanto:

$$\bar{P} = \frac{E}{T}$$

Para realizar el análisis de energía y potencia del viento, en un período dado, se hace uso de las siguientes representaciones gráficas, de la información obtenida de las velocidades del viento en el lugar bajo estudio.

1. Curvas de frecuencia de velocidad.
2. Curvas de duración de velocidad.
3. Curvas de duración de potencia.

## II. CURVAS DE FRECUENCIA DE VELOCIDADES

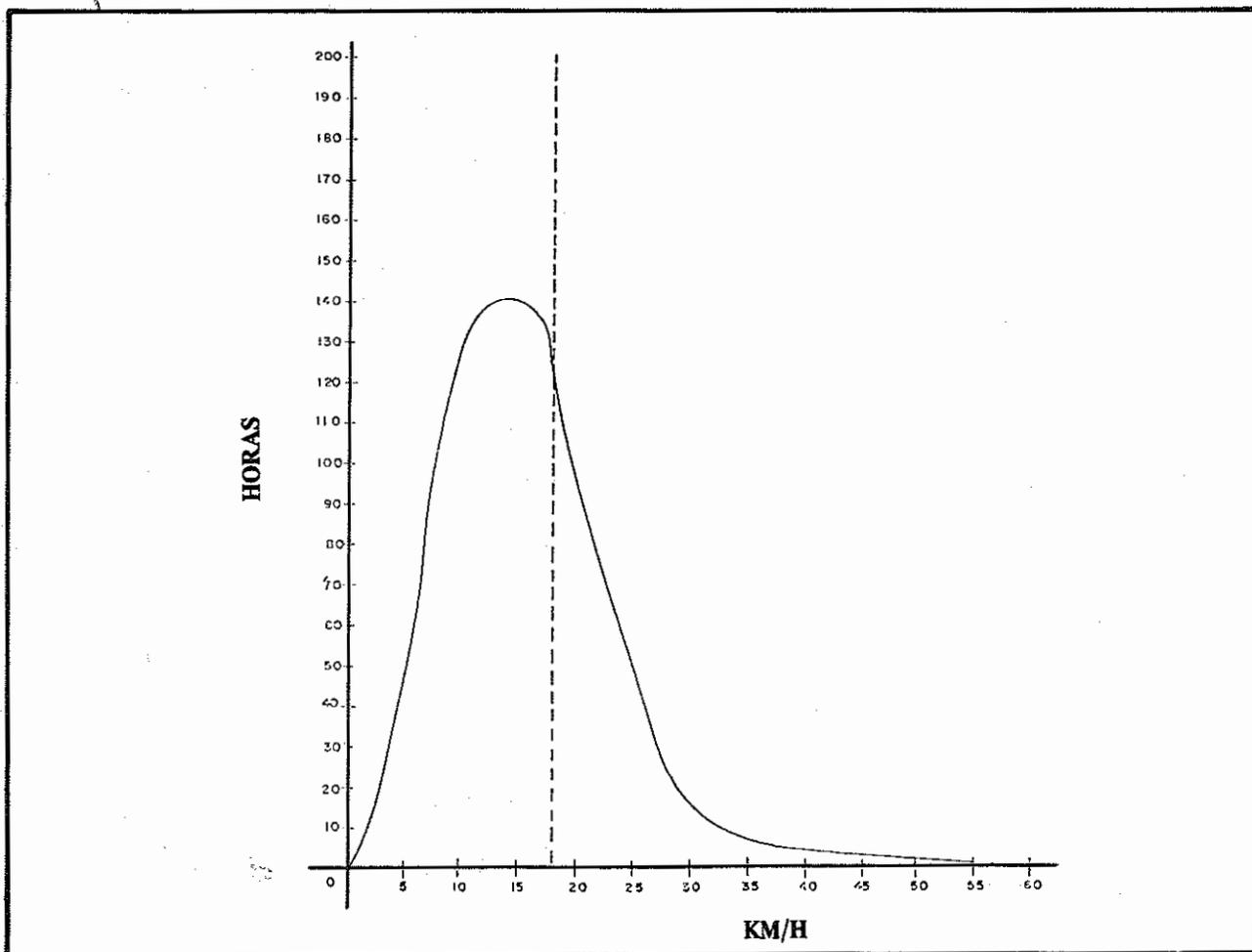
Los registros continuos de velocidad del viento se traducen a una curva de frecuencia de velocidades,

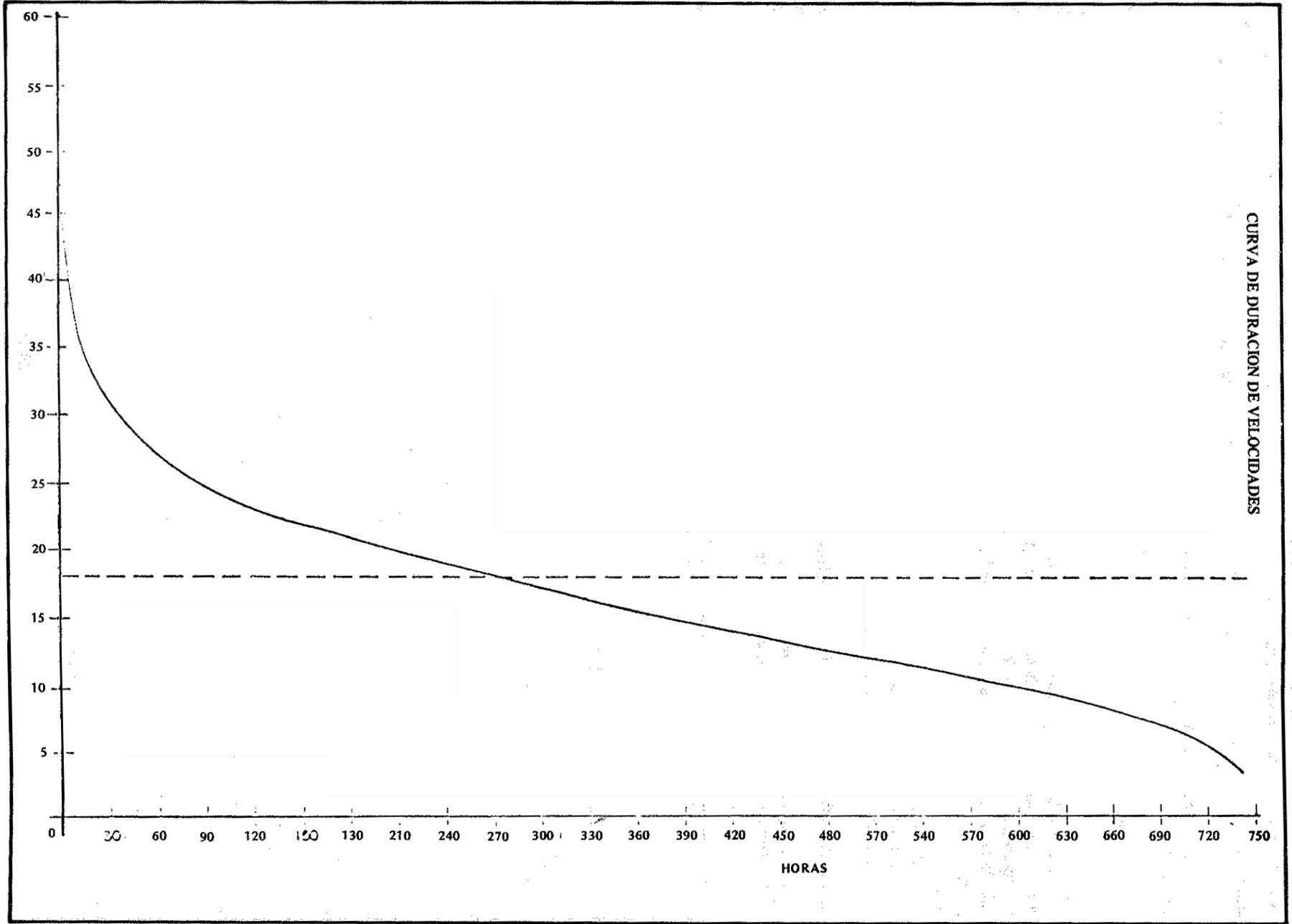
que en realidad corresponde a un histograma de velocidades ver figura 2. Esta curva de distribución se hace para cada mes y para el año completo. Esto permite conocer, por rangos de velocidades, el porcentaje del tiempo total que le corresponde. Al agrupar los datos mensualmente, se determinan las variaciones estacionales y finalmente el comportamiento del viento a lo largo del año. Hacer una buena caracterización de la distribución de velocidades a lo largo del año, requiere de mediciones anemográficas por 5 años al menos, aunque se puede prescindir de éstas si se cuenta con información que permita establecer correlaciones. Esta información es indispensable para establecer la energía que contiene el viento y poder estimar así la que es potencialmente aprovechable en un período determinado.

## III. CURVAS DE DURACION DE VELOCIDADES

Una forma útil de representar la distribución de frecuencia de velocidades durante un período dado, es con la curva de duración de velocidades, mostrada en la figura 3, la que indica progresivamente el número de horas en que el viento tuvo una velocidad superior a los valores de cada ordenada.

FIGURA 2





CURVA DE DURACION DE VELOCIDADES

FIGURA 3

#### IV. CURVAS DE DURACION DE POTENCIA.

Si la curva de duración de velocidades puede ser convertida en una curva de duración de potencia al cubicar los valores de las ordenadas y aplicar el coeficiente de proporcionalidad K, de esta forma se hace patente la importancia energética de un sitio relativo a otro al comparar las áreas bajo la curva que son indicativas de la energía del viento.

El uso de procedimientos computacionales para procesar la información del viento, a partir de registros anemométricos continuos, ha desplazado este método de evaluación energética de un sitio, pero no por ello puede decirse que sea obsoleto.

#### V. CONVERSION DE LA ENERGIA EOLICA

La extracción de energía del viento se efectúa a través de sistemas aerodinámicos convesores, conocidos como Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE). Un SCEE convierte la energía cinética del aire en energía mecánica de rotación. Esta energía puede a su vez ser convertida en otras formas de energía: eléctrica o térmica, o ser utilizada directamente como energía mecánica.

En todo cambio de una forma de energía a otra, se incurre en ciertas pérdidas. La relación de la energía disponible para su utilización y la energía primaria de donde se obtuvo, define la eficiencia del sistema de conversión.

En el caso de una turbina eólica, las pérdidas en el rotor pueden atribuirse a dos factores: al movimiento rotacional comunicado al aire por las aspas y a la fricción contra el aire.

##### 1. Potencia Teórica Máxima de una Turbina Eólica.

Para determinar la eficiencia máxima de una turbina eólica, hay que asumir las siguientes condiciones:

- Las aspas trabajan sin arrastre por fricción con el aire.
- Una envolvente bien definida separa el flujo que pasa a través del disco del rotor, del que lo hace por fuera del mismo.
- Las presiones estáticas dentro y fuera de la envolvente y lejos anterior y posteriormente del rotor, son iguales a la presión estática de la corriente libre ( $P_2 = P_\infty$ )
- El empuje está aplicado en forma uniforme sobre todo el disco del rotor.
- El disco no imparte rotación alguna al flujo.

Si definimos un volumen de control como el que se muestra en la figura 4 y la aplicamos al teorema de momentos, suponiendo que los planos de corriente arriba y corriente abajo del volumen de control están infinitamente lejos del plano de la turbina, se tiene:

$T =$  momento en el flujo que entra - momento en el flujo que sale

$$T = m (V_\infty \cdot V^2) = \rho A U (V^\infty - V) \quad (1)$$

donde m es el flujo de masa por unidad de tiempo.

También, a partir de las condiciones de presión, el empuje puede ser expresado como:

$$T = A (P^+ - P^-) \quad (2)$$

Ahora, aplicando la ecuación de Bernoulli al flujo corriente arriba de la turbina, se obtiene:

$$1/2 \rho V^2 + P^\infty = 1/2 \rho U^2 + P^+ \quad (3)$$

y para corriente abajo:

$$1/2 \rho V^2 + P_\infty = 1/2 \rho U^2 + P^- \quad (4)$$

o, si se restan estas dos ecuaciones:

$$P^+ - P^- = 1/2 \rho (V_\infty^2 - V_2^2) \quad (5)$$

substituyendo la ecuación (5) en la (2) se tiene:

$$T = 1/2 A \rho (V_\infty^2 - V_2^2) \quad (6)$$

ahora, igualando la ecuación (6) con (1) se tiene:

$$1/2 A \rho (V_\infty^2 - V_2^2) = \rho A U (V^\infty - V_2)$$

$$o, \quad U = \frac{V^\infty + V_2}{2} \quad (7)$$

Este resultado establece que la velocidad a través de la turbina es el promedio de las velocidades antes y después de la turbina.

Si ahora definimos el factor de interferencia como:

$$U = V^\infty (1 - a) \quad (8)$$

Si hacemos la ecuación (7) igual a (8) se tiene:

$$V^\infty (1 - a) = \frac{V_\infty + V_2}{2}$$

Con lo que la velocidad de la estela de la turbina puede ser expresada como:

$$V_2 = V^\infty (1-2a)$$

por lo tanto,

$$a = 1 - \frac{V^\infty + V_2}{2V^\infty}$$

Lo cual implica que si el rotor absorbe toda la energía, v.gr.,  $V_2 = 0$ , el factor de interferencia tendrá un valor máximo de  $1/2$ .

Dado que la potencia es expresada como el producto del flujo de masa por unidad de tiempo por el cambio de energía cinética, la potencia  $P$ , es:

$$P = m \Delta E.C + \rho A U \left( \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \right) + 1/2 \rho A V_1^3 4a (1-a)^2$$

$$\text{o: } P = 2 \rho A V_1^3 a (1-a)^2$$

La máxima potencia se obtiene cuando:

$$\frac{dP}{da} = 0$$

$$\frac{dP}{da} = 2 \rho A V_1^3 (1-4a-3a^2) = 0$$

$$\text{o, } a=1 \quad \text{o, } a = 1/3$$

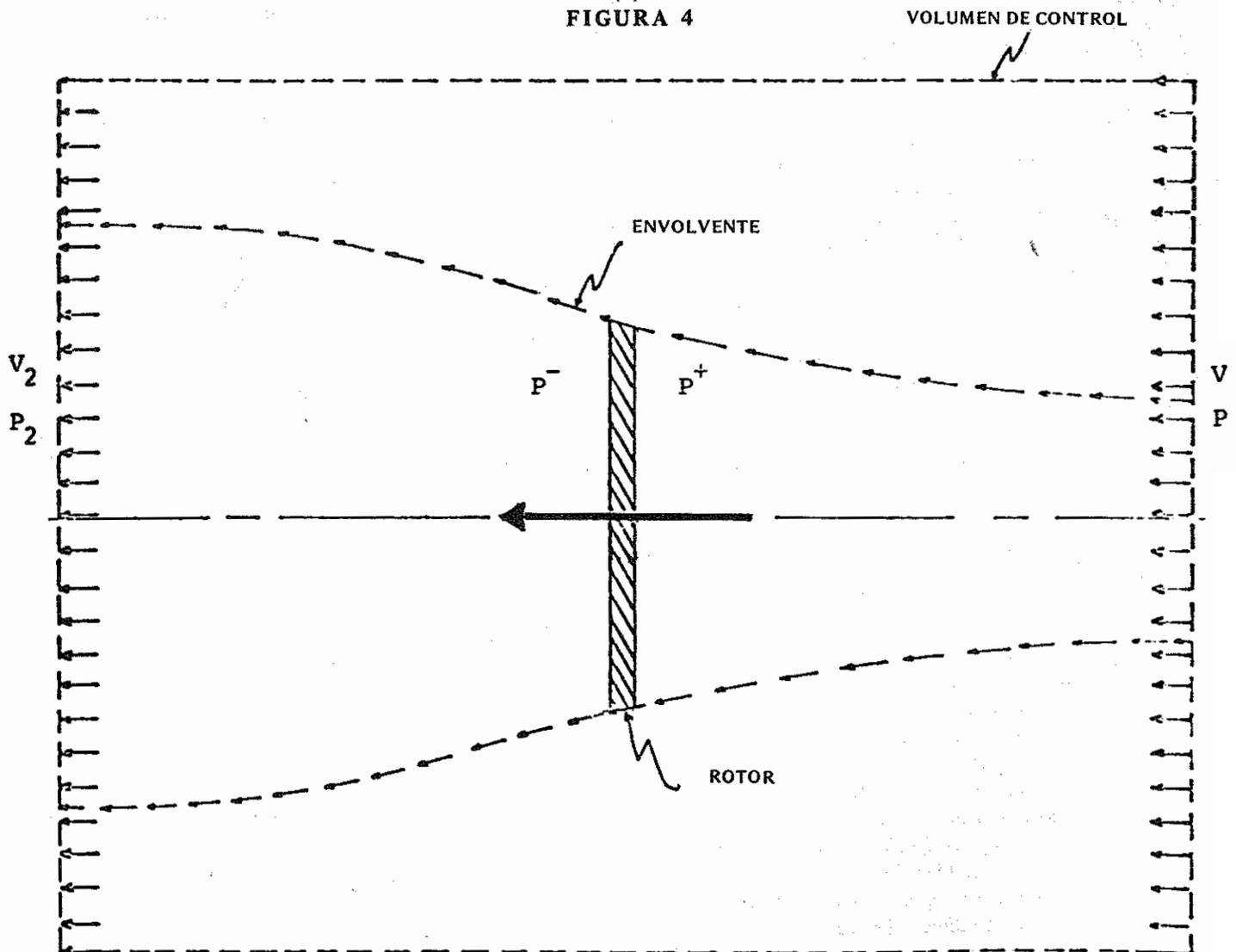
$P$  máxima se obtiene para:  $a=1/3$   
luego:

$$P_{\max} = 16/27 \quad (1/2 \rho A V_1^3)$$

Este coeficiente  $(16/27) = 0,593$ , se llama coeficiente de potencia y representa eficiencia del rotor de una turbina eólica:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p$$

FIGURA 4



## 2. Sistemas Conversores de Energía Eólica

Existen diversos tipos de Sistemas Conversores de Energía Eólica (SCEE), operando sobre todos ellos la restricción teórica y práctica por supuesto, de la energía del viento que es posible recuperar.

La figura 5, ilustra el esquema general en diagrama de bloques de un aerogenerador, o SCEE para producción de electricidad.

Básicamente, los dos primeros bloques son comunes a todo tipo de SCEE, siendo el último el específico del tipo de aplicación.

El primer bloque indica el rotor propiamente, que extrae parte de la energía del viento, que como ya hemos visto, de toda su potencia, existe un límite teórico próximo a 60 o/o que nos refiere la que es posible aprovechar en condiciones óptimas de transferencia de energía para un sistema conversor. En la realidad, un aeromotor de aspas aerodinámicas y alta eficiencia, se encuentra en el rango del 40 al 45 o/o de eficiencia de conversión.

Como en toda conversión energética, la relación entre la energía disponible para su utilización y la energía primaria de donde se obtuvo, define la eficiencia del sistema. El coeficiente de potencia  $C_p$  representa la eficiencia aerodinámica del rotor, cuyas pérdidas pueden atribuirse principalmente al movimiento rotacional comunicado al aire por las aspas y a la fricción contra el mismo. Este coeficiente, depende del tipo y características de las aspas del rotor, y varía con la razón de velocidad tangencial ( $\mu$ ), la cual está definida como la relación instantánea entre la velocidad de la punta del aspa y la velocidad del viento. El valor máximo de  $C_p$  es alcanzado a un valor de  $\mu$  característico de cada rotor. Si este valor es menor de 4, el rotor puede ser considerado como de baja velocidad, y su máxima eficiencia  $C_p$  será de 0.3 menor. La solidez del rotor, definida como la relación entre la superficie de las aspas y el área barrida por el rotor, tiende a valores grandes para turbinas de este tipo. Si el valor de  $\mu$  es del orden de 4 ó superior para  $C_{pmax}$ , se trata de un rotor de alta velocidad con una eficiencia máxima  $C_p$  del orden de 0.45. La solidez en este tipo de rotores tiende a valores pequeños.

Si la velocidad nominal del rotor corresponde al valor máximo de  $C_p$ , un aumento o disminución de la velocidad del viento resultará en una disminución de  $C_p$ , si la velocidad de la flecha se mantiene constante, figura 6. Por otro lado, se permite que la velocidad del rotor varíe con la velocidad del viento (razón de velocidad tangencial  $\mu$  constante), se puede lograr un máximo  $C_p$  para todo rango de velocidades de

operación. Esto resulta de dos modos básicos de generación: sistemas de velocidad constante, en los cuales la velocidad del rotor se mantiene constante cambiando el ángulo de ataque de las aspas y/o las características de la carga; y sistemas de velocidad variable, en los cuales se permite que la velocidad del rotor varíe proporcionalmente a la velocidad del viento, lo cual permite  $C_{pmax}$  para la mayor parte del rango de operación. En la figura 6 se muestran las características de potencia para algunos tipos de rotores. Existe un sinúmero de configuraciones de SCEE, cada una con ciertas ventajas particulares, y adecuado a aplicaciones más o menos específicas. Las figuras 7 y 8 muestran las principales. Básicamente, todas podrían agruparse en dos tipos: sistemas de eje vertical y sistemas de eje horizontal. Los sistemas incluidos en el primer grupo, no necesitan orientarse ya que aprovechan vientos de cualquier dirección. Los del segundo, aunque limitados por su velocidad de respuesta a cambios de dirección en el viento, se caracterizan por eficiencias más altas que los del primero.

FIGURA 5

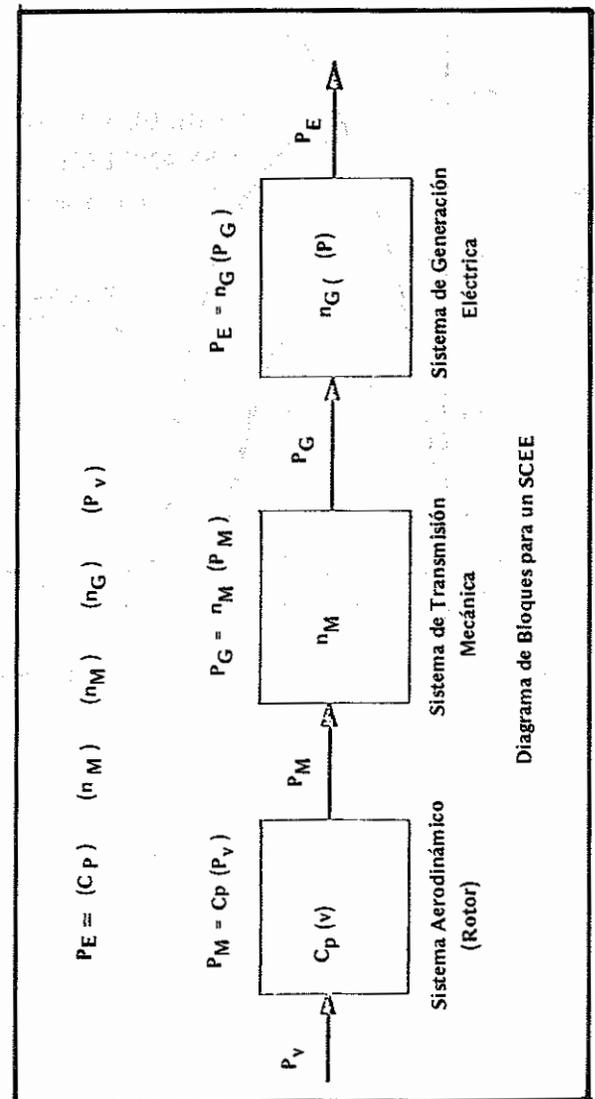
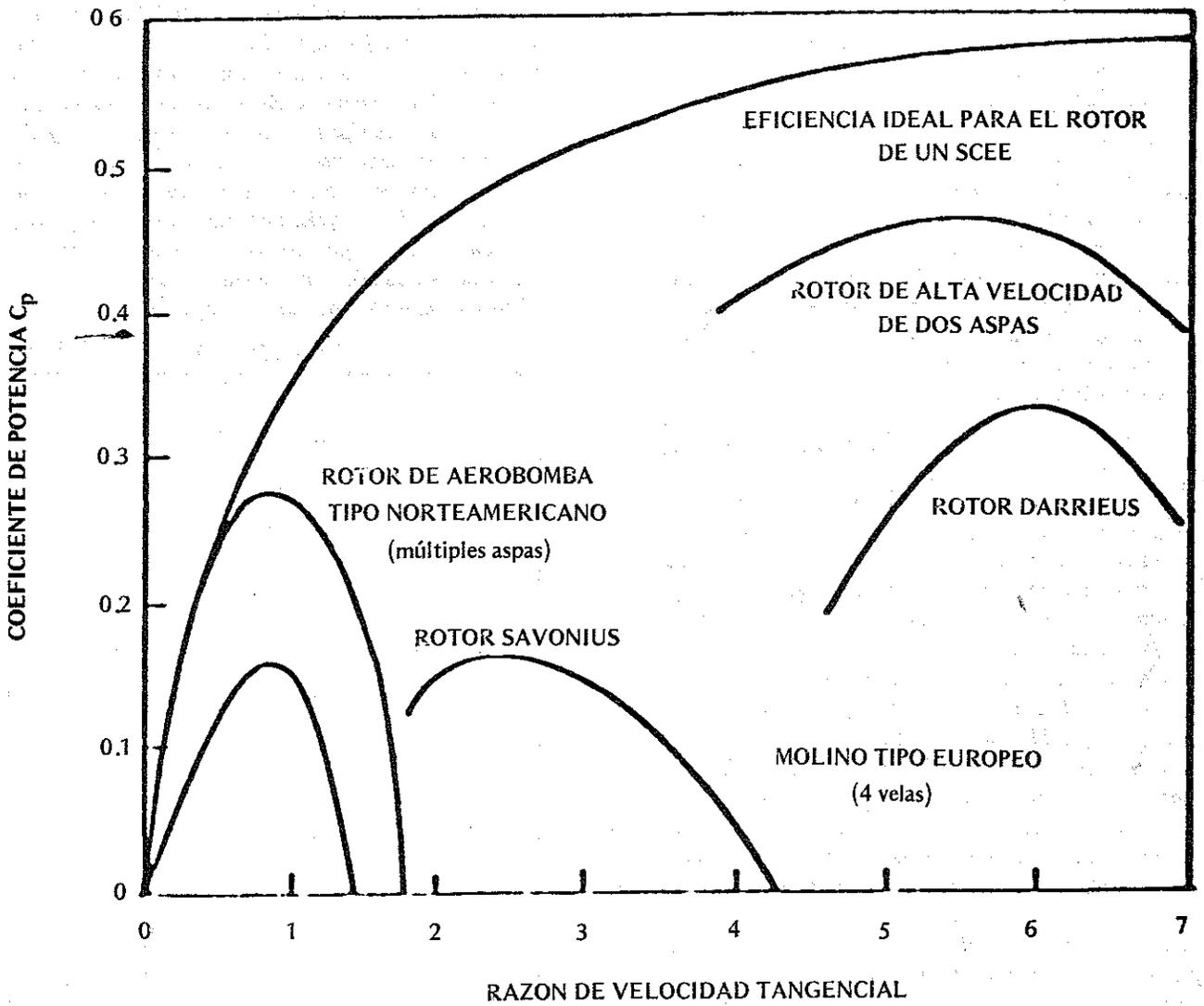


FIGURA 6

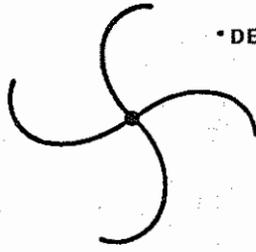


CONFIGURACIONES DE EJE VERTICAL

FIGURA 7

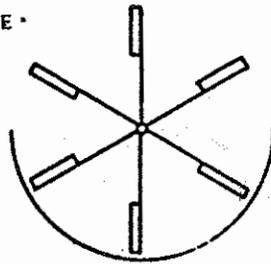


SAVONIUS

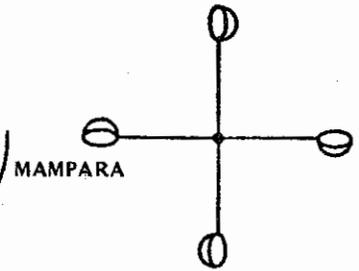


SAVONIUS  
MULTIPLE

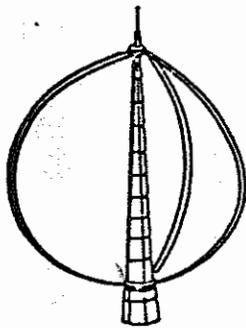
• DE ARRASTRE •



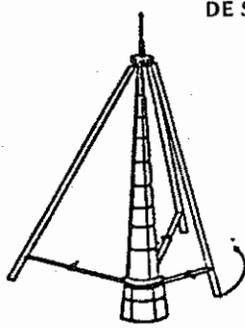
PANEMONAS



COPAS

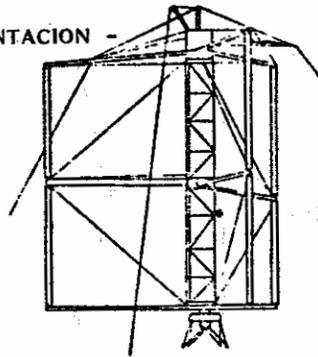


Δ - DARRIEUS

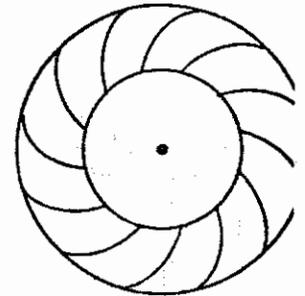


Δ - DARRIEUS

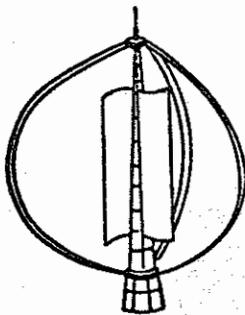
DE SUSTENTACION -



H - DARRIEUS



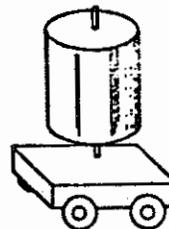
TURBINA



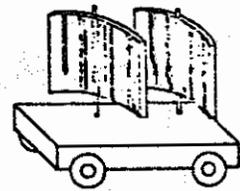
HIDRIDO  
SAVONIUS  
DARRIEUS



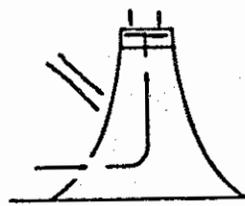
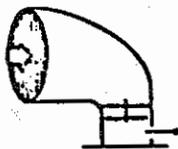
SAVONIUS  
DESPLAZADO



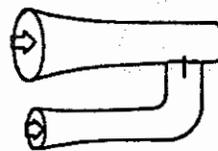
MAGNUS



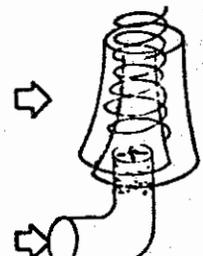
PERFIL  
AERODINAMICO



CONVECTIVO  
SOLAR



VENTURI



VORTEX  
CONFINADO

FIGURA 8

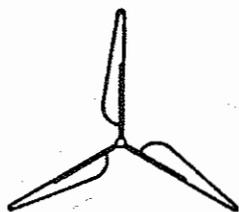
CONFIGURACIONES DE EJE HORIZONTAL



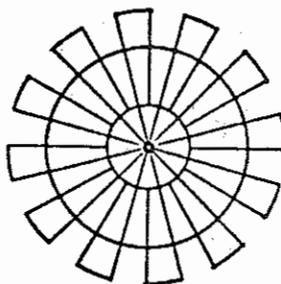
UN ASPA  
CONTRAPESADA



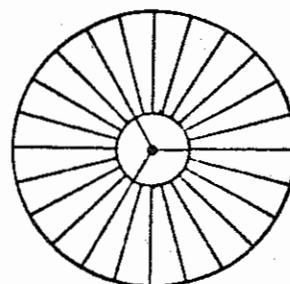
DOS ASPAS



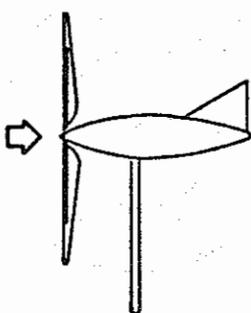
TRES ASPAS



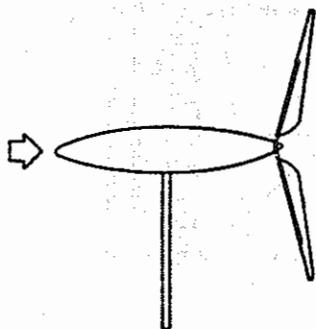
ROTOR DE ASPAS MULTIPLES  
DE AEROBOMBA TIPO  
NORTEAMERICANO



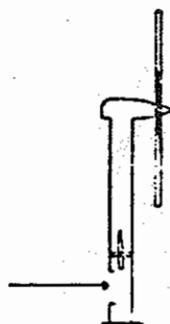
ROTOR CHALK  
(RUEDA DE BICICLETA)



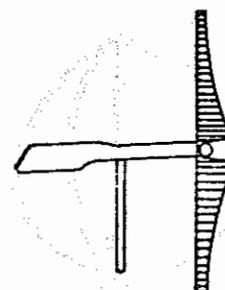
VIENTO ARRIBA



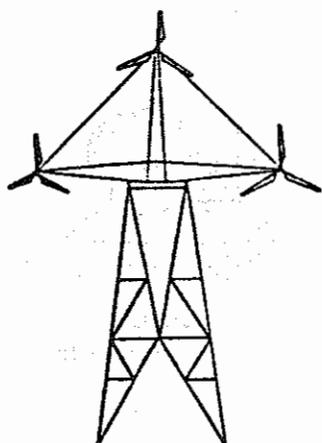
VIENTO ABAJO



ENFIELD-ANDREAU

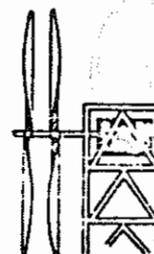


ASPA VELA

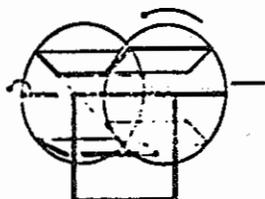


MULTIROTOR

DOBLE ROTOR  
CON ROTACION  
OPUESTA



SAVONIUS DE FLUJO  
CRUZADO



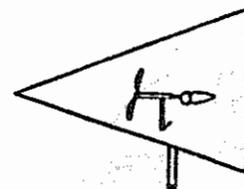
PANEMONAS DE FLUJO  
CRUZADO



DIFUSOR



CONCENTRADOR



VORTEX  
NO CONFINADO

### 3. Energía Aprovechable y Análisis Económico Preliminar.

Hasta la medición de un sitio, establecido el patrón de distribución anual de velocidades, considerando las variaciones estacionales y traducido esto a un patrón anual de energía y potencia, puede determinarse el comportamiento de un sistema conversor de energía eólica, considerando básicamente tres parámetros de diseño:

- a) Velocidad de inicio de operación.
- b) Velocidad límite superior de operación
- c) Eficiencia de conversión promedio en el rango de velocidades de operación.

Correlacionando estas características del equipo con la caracterización energética del sitio, es posible predecir la cantidad de energía útil aprovechable a partir del viento. Esta cantidad total anual de energía, se correlaciona a su vez con el costo del sistema, considerando la inversión inicial, tasas de interés y costos de operación y mantenimiento durante su vida útil, para determinar el costo anual de la instalación, obteniendo así nuestro costo por unidad de energía, a partir de un sistema conversor de energía eólica.

Este costo unitario es comparado con el obtenido a partir de otras fuentes de energía y establecer así su factibilidad económica, cuando otras alternativas son posibles. La realidad por cuanto al aprovechamiento de la energía eólica en zonas aisladas es la de que no hay otras alternativas variables que puedan competir con la energía eólica, máximo tratándose de aplicaciones como el bombeo de agua.

### 4. Explotación de la Energía Eólica.

Al respecto de la energía eólica, como de la energía solar directa, las "desventajas" que se les atribuyen, en una sociedad industrial ávida de energía, son su intermitencia y su baja densidad energética, si la comparamos con los medios convencionales de producción de energía en forma masiva. La realidad es que la energía solar directa así como la eólica, tienen las ventajas que los sistemas convencionales no tienen: el del acceso a la energía. Si bien esta energía por sí misma no presenta las características de disponibilidad y continuidad de las formas convencionales, donde ya existe la infraestructura de distribución, a través de sistemas de almacenamiento o respaldo se pueden lograr las características antes descritas. Esto indudablemente aumenta el costo del sistema, y el cos-

to unitario de la energía disponible, aún así su utilización puede resultar competitiva con otras fuentes. Desde un punto de vista económico, al nivel actual de la tecnología de aprovechamiento de la energía eólica y el nivel de producción industrial de estos equipos, son susceptibles aún de significativas disminuciones en sus costos, al ampliarse la magnitud de su mercado, así como de innovaciones en su construcción. La realidad actual es que para lugares aislados, normalmente marginados y pauperizados, cualquier fuente de energía, convencional o no, es demasiado cara.

### 5. El Sistema de Conversión de Energía Eólica como Economizador de Combustible.

Un conjunto de aerogeneradores de mediana y gran capacidad, produciendo energía eléctrica, e interconectados a líneas de subtransmisión o distribución y sincronizadas a ellas, alimentarían al sistema eléctrico con determinadas cantidades de energía, que representarían un consecuente ahorro de agua en plantas hidroeléctricas o combustible en plantas termoeléctricas. Este conjunto de aerogeneradores, al representar una capacidad instalada del orden del 10 o/o de un sistema interconectado, alimentan a éste de cantidades considerables de energía, sin consumir otros recursos y sin afectar la estabilidad del sistema, dado el carácter irregular del viento.

### 6. Perspectivas en la Utilización de la Energía Eólica.

El agregar grandes plantas hidroeléctricas, termoeléctricas o atómicas a los grandes sistemas interconectados, el descubrir y explotar nuevos y grandes yacimientos de petróleo o carbón, en nada benefician a aquellos sectores de la población rural para quienes la infraestructura, por cuanto a las redes de comunicación, transporte y energéticos brilla por su ausencia.

Por lo contrario, propicia patrones centralistas que agudizan la marginación y la migración a las ciudades.

El aprovechamiento de la energía eólica, como de todas las formas de energía solar, las llamadas fuentes no convencionales, constituyen la única opción inmediata, de proporcionar en forma muy limitada aún, formas útiles de energía a las zonas rurales alejadas de las redes de distribución de energéticos convencionales.